

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Aktivní filtry s operačními zesilovači
Active Filters with Operational Amplifiers

2012

Tomáš Chalupka

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Chalupka**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika
Téma: **Aktivní filtry s operačními zesilovači**
Active Filters with Operational Amplifiers

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor aktivních filtrů s operačními zesilovači.
2. Návrh modelů aktivních filtrů s operačními zesilovači.
3. Simulační ověření modelů aktivních filtrů s operačními zesilovači.
4. Analýza výsledků simulací a jejich porovnání s teoretickými předpoklady.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Winder S.: Filter Design. Newnes, Reed Educational and Professional Publishing, Ltd, 1998.
2. Hájek K., Sedláček J.: Kmitočtové filtry. BEN Praha, 2002.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

PROHLÁŠENÍ

„Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma Aktivní filtry s operačními zesilovači vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 4. 5. 2012



.....
(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc. za odbornou pomoc a další cenné rady při zpracovávání mé bakalářské práce.

V Ostravě dne 4. 5. 2012

Handwritten signature in blue ink, reading "Chalupka Tomáš".

.....
(podpis autora)

ABSTRAKT

Hlavním cílem této práce je provést teoretický rozbor aktivních filtrů s operačními zesilovači. V práci jsem uvedl základní aproximace, pomocí kterých jsem dále navrhnul základní typy filtrů 1. až 5. řádu, a to horní propust, dolní propust, pásmovou propust a pásmovou zádrž. Následně po návrhu jednotlivých filtrů jsem provedl jejich simulace v programu OrCAD, z něhož jsem použil amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky. V poslední části práce jsou analyzovány výsledky simulací a porovnány s teoretickými předpoklady.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aktivní filtr, kmitočtový filtr, horní propust, dolní propust, pásmová propust, pásmová zádrž, operační zesilovač, návrh filtru.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to perform a theoretical analysis of active filters with operational amplifiers. At work I have stated the basic approximation, by which I designed basic types of filters 1st to 5th order, and high-pass, low pass, bandpass and band-stop filter. Following the design of individual filters I performed simulation in the OrCAD from which I have used the amplitude and phase frequency characteristics. In the last part the results of simulations are analyzed and compared with theoretical assumptions.

KEY WORDS

Active filter, frequency filter, high-pass, low pass, band pass, band-stop filter, operational amplifier filter design

Obsah

ÚVOD.....	1
1. KMITOČTOVÉ FILTRY.....	2
1.1. Základní vlastnosti a použití	2
1.2. Základní rozdělení filtrů.....	2
1.2.1. Selektivní filtry.....	2
1.2.2. Korekční filtry	3
1.2.3. Fázovací (zpožďovací) obvody	4
1.3. Základní stavební prvky filtrů	4
1.3.1. Kondenzátor	5
1.3.2. Rezistor	5
1.3.3. Aktivní prvek (Operační zesilovač)	5
1.4. Základní typy aproximací.....	6
1.4.1. Besselova aproximace	6
1.4.2. Butterworthova aproximace	6
1.4.3. Čebyševova aproximace.....	7
1.5. Základní parametry filtrů	8
1.6. Principy funkce filtrů ARC	8
1.7. Kritéria návrhu filtru	9
2. NÁVRHY MODELŮ AKTIVNÍCH FILTRŮ.....	10
2.1. Návrh dolní propusti 1. řádu	11
2.2. Návrh dolní propusti 2. řádu	12
2.3. Návrh dolní propusti 3. řádu	13
2.4. Návrh dolní propusti 4. řádu	14
2.5. Návrh dolní propusti 5. řádu	14
3. SIMULACE NAVRŽENÝCH FILTRŮ	15
3.1. Dolní propust.....	15
3.2. Horní propust	18
3.3. Pásmová propust	22
3.4. Pásmová zádrž.....	25
4. ZÁVĚR.....	29
Seznam literatury.....	30
Přílohy.....	31

ÚVOD

Práce se zabývá teoretickým rozбором aktivních filtrů s operačními zesilovači. Zejména základním rozdělením filtrů, volbou stavebních prvků a typem aproximace, která „určuje“ strmost modulových (amplitudových) charakteristik. Další kapitola je zaměřena na návrh aktivního filtru typu dolní propust s jedním operačním zesilovačem, a to pro 1. až 5. řád. Pro horní propust je návrh stejný jako pro dolní propust daného řádu, proto není uveden. Pásmová zadrž a pásmová propust se skládá s dílčích zapojení dolní a horní propusti. Cílem práce je seznámit se s návrhem a nasimulovat tyto zapojení pro různé aproximace, porovnat jejich vlastnosti a shrnout výsledky.

1. KMITOČTOVÉ FILTRY

1.1. Základní vlastnosti a použití

Kmitočtové filtry jsou lineární elektrické obvody využívané v mnoha oblastech elektrotechniky a elektroniky. Hlavním úkolem filtrů je selekce (výběr) kmitočtových složek signálu podle jeho kmitočtu. Filtry obvykle propouštějí kmitočtové složky bez útlumu (oblast propustného pásma), jiné filtry kmitočtové složky potlačují (oblast nepropustného pásma). Tyto vlastnosti se vyjadřují pomocí modulové (amplitudové) kmitočtové charakteristiky, což je závislost modulu napětí na kmitočtu.

Například v radiotechnice, kde se využívá pásmových propustí při výběru přijímaného signálu (vstupní obvody přijímačů, mezifrekvenční filtry), Dolních a horních propustí jako výhybek při rozdělování kmitočtových pásem v anténních obvodech a předzesilovačích. Pásmové zádrže využívané pro potlačování různých rušivých signálů. V telekomunikační technice při přenosu dat apod.

Další významnou oblastí využití je v elektroakustice, kde se ve velké míře využívají korekční filtry (korektory hloubek, výšek, pásmové korektory), různé typy filtrů pro omezení šumu. Dolní, horní a pásmové propusti tvoří kmitočtové výhybky pro reproduktorové soustavy. Kmitočtové filtry najdeme také v oblasti měřicí techniky, a to jako filtry pro výběr měřeného frekvenčního pásma (měřiče harmonického a dalších typů zkreslení, různá vysokofrekvenční měření). [1]

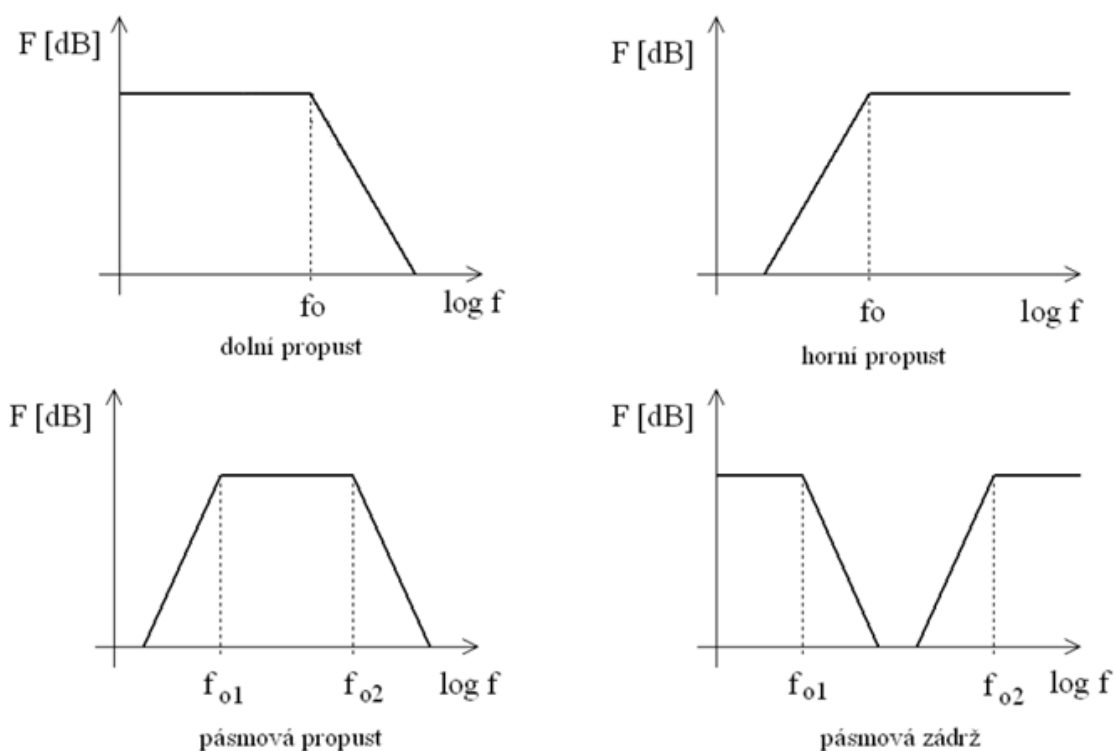
1.2. Základní rozdělení filtrů

Kmitočtové filtry dělíme podle funkce filtru a tvaru kmitočtových charakteristik do tří základních skupin – selektivní filtry, korekční filtry a fázovací (zpožďovací) obvody.

1.2.1. Selektivní filtry

Úkolem selektivních filtrů je potlačení přenosu kmitočtových složek signálu v nepropustném pásmu. Přenos v propustném pásmu by měl být konstantní, zato v nepropustném pásmu nulový. Podle pásma propustnosti se dělí na základní typy filtrů.

- Dolní propust (DP) – propouští kmitočty nižší než mezní kmitočet f_0
- Horní propust (HP) – propouští kmitočty vyšší než mezní kmitočet f_0
- Pásmová propust (PP) – propouští kmitočty mezi mezním horním kmitočtem f_{02} a dolním kmitočtem f_{01}
- Pásmová zadrž (PZ) – zadržuje kmitočty mezi mezním horním kmitočtem f_{02} a dolním kmitočtem f_{01}



Obr. 1: Frekvenční charakteristiky základních typů filtrů ($F \equiv K_U$)

1.2.2. Korekční filtry

Hlavním úkolem korekčních filtrů je, aby kmitočtová závislost přenosu K_2 , která řídí přenos některých bloků přenosového řetězce K_1 tak, aby modul přenosu celé soustavy K byl konstantní.

1.2.3. Fázovací (zpožďovací) obvody

Pro fázovací obvody je nejdůležitější kmitočtově závislá fázová charakteristika. Jejich modulová charakteristika je kmitočtově nezávislá. Tyto filtry nacházejí využití tam, kde je potřeba dosáhnout časový posuv v závislosti na kmitočtu a to beze změny modulu přenosu. [1]

1.3. Základní stavební prvky filtrů

Kmitočtové filtry lze realizovat několika způsoby, které do jisté míry určují vlastnosti filtru. Pro dané použití vybíráme nejvhodnější variantu. Máme-li číslicové zpracování signálu a dostatečnou výpočetní kapacitu, použijeme číslicový filtr. V případě vysokých kmitočtů, slabých a zarušených signálů je vhodné použít analogový filtr v integrovaném provedení profesionální výroby (např.: mezifrekvenční filtry přijímačů). V případě, že nám tyto požadavky nevyhovují, jsme nuceni vyrobit filtr s požadovanými vlastnostmi z dostupných diskrétních součástek.

Filtry RC

Tyto filtry jsou jednoduché, dostupné a hlavně levné, proto od nich nemůžeme čekat špičkové vlastnosti. Využití mají pouze jako jednoduché filtry prvního a druhého řádu. RC filtry vyšších řádů se používají velmi zřídka.

Filtry RLC

Umožňují realizovat téměř libovolný typ filtru. Jejich největší nevýhodou je požití cívek (rozměry, ceny, ztráty). Kmitočtový rozsah těchto filtrů je 100kHz až 300MHz

Filtry ARC

Jinak známé jako aktivní filtry. Aktivní filtry principiálně nahrazují RLC filtr. Místo induktorů se využívají rezistory, kondenzátory a jako aktivní prvek je použit operační zesilovač. Vzhledem k použití operačního zesilovače se jejich použití omezuje na kmitočtové pásmo 0,1Hz – 100kHz a v moderních aplikacích až do desítek MHz. Výhodou těchto filtrů je jednoduchá přeladitelnost, a to změnou hodnoty odporů. Mezi nevýhody se řadí nutnost napájení aktivních prvků.

1.3.1. Kondenzátor

Hlavním kritériem pro volbu kapacity je, aby kondenzátor měl dostatečnou stabilitu hodnoty kapacity. Rozhodující je velikost a také cena, proto se prvky volí z řad E6 a E12 tak, aby se nemusely skládat z více prvků. Z hlediska ztrát se používají kondenzátory s umělohmotným dielektrikem (polystyrénové) nebo keramické s malými hodnotami kapacit a dielektrikem ze stabilní keramiky. [1]

1.3.2. Rezistor

Rezistory se vyrábí v různých odporových řadách (E24 – E196) a s různou přesností (běžně 1%), proto se volba rezistoru jeví jako jednodušší. Nemáme-li přesnou požadovanou hodnotu odporu, můžeme ji poměrně snadno realizovat pomocí sériové či paralelní kombinace dvou rezistorů. [1]

1.3.3. Aktivní prvek (Operační zesilovač)

Jako aktivního prvku se využívá různých zapojení zesilovačů, která umožňují spolu s napájecím zdrojem kompenzovat ztráty v RC obvodu. Zesilovače bývaly realizovány z diskrétních součástek, ale v dnešní době se využívají integrované obvody, a to jako jedno či více stupňové tranzistorové zesilovače a operační zesilovače (OZ) s napěťovou nebo proudovou zpětnou vazbou, transkonduktanční zesilovače nebo speciální bloky (proudové konvejery – především CCII)

Oblast pracovních kmitočtů se pohybuje do 1MHz, je tedy vhodné volit operační zesilovač s napěťovou zpětnou vazbou, protože jsou vyhovující, levné a běžně dostupné. Aktivní prvky jsou velmi složitým stavebním prvkem, proto se u nich projevuje mnoho reálných vlivů omezující vlastnosti filtrů. Pro kmitočtovou oblast od 100kHz do 1MHz je vhodné použít operační zesilovače typu TL 070 až 74, popřípadě jejich obdobnou variantu TL 080 až 84. Výhodou je jejich velký vstupní odpor a malá proudový ofset a šum. Pro vyšší kmitočty a nižší napěťový ofset můžeme použít bipolární OZ typu NE5532. [1]

1.4. Základní typy aproximací

Problémem syntézy je nalezení koeficientů přenosové funkce tak, aby splňovala toleranční pole modulové charakteristiky. Dá se říct, že existuje nekonečně mnoho řešení, a proto lze přistupovat k problému syntézy z různých hledisek. V praxi se využívá několik typů základních aproximací, vyhovujících základním požadavkům. Pro specifické přenosové funkce se využívají jiné méně používané typy aproximací. Nejčastěji se lze setkat s následujícími druhy standardních aproximací.[1]

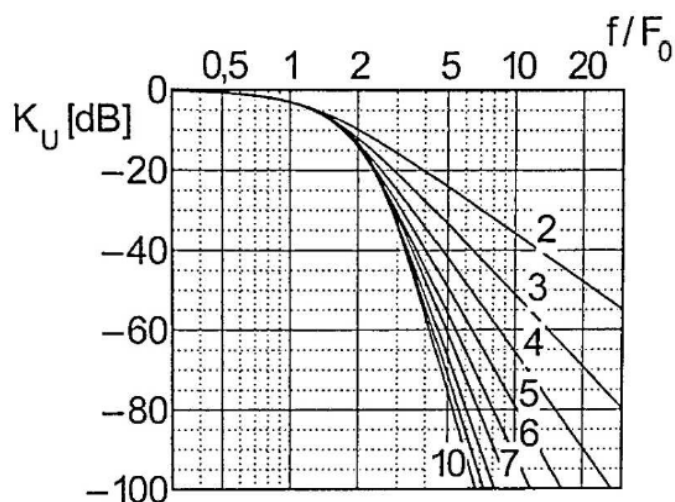
1.4.1. Besselova aproximace

Vychází z požadavku na konstantní skupinové zpoždění v propustném pásmu. Potřebný řád filtru lze určit přímo z modulových charakteristik. Např. pro požadavek $F_{pn}=5$ a pro $K_{pOT}=40\text{dB}$ lze z grafu na obr. 2. zjistit, že zadání splňuje 4. řád. Tento typ aproximace se používá především v případech, kdy záleží na fázových vlastnostech (zachování tvaru průchozího signálu). [1]

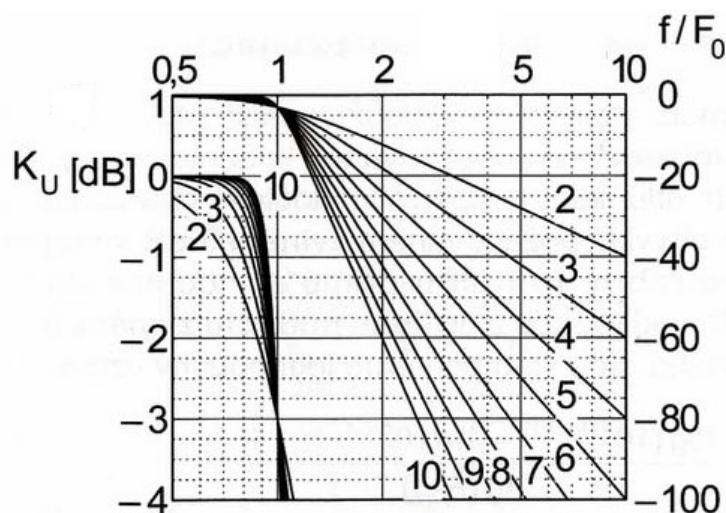
Tento typ aproximace je vhodný pro filtraci kmitočtově a fázově modulovaných signálů. Velkou nevýhodou je relativně malá strmost modulové charakteristiky. Vyšší strmost lze dosáhnout použitím vyššího řádu filtru, což má negativní důsledek na složitost zapojení.

1.4.2. Butterworthova aproximace

Patří mezi nepoužívanější, protože je přijatelným kompromisem mezi linearitou fázové charakteristiky a dosažitelným útlumem modulové kmitočtové charakteristiky pro relativně nízký řád filtru. Přímou z modulové charakteristiky lze určit řád filtru s požadovaným zvlněním 3dB. Viz obr. 3.



Obr. 2: Modulová charakteristika Besselovy aproximace pro 2. až 10. Řád [1]



Obr. 3: Modulová charakteristika Butterworthovy aproximace pro 2. až 10. řád, levá část grafu ukazuje ve zvětšeném měřítku charakteristiky v propustném směru [1]

1.4.3. Čebyševova aproximace

Tato izoexternální aproximace umožňuje dosáhnout prakticky nejstrmějších charakteristik v přechodném pásmu s velkým potlačením přenosu v nepropustném pásmu. Avšak nevýhodou čebyšovovy aproximace je poměrně velká nelinearita fázové charakteristiky. V případě volby malého zvlnění modulové charakteristiky se částečně sníží strmost, ale zlepší se fázové vlastnosti a odezva na jednotkový skok.

1.5. Základní parametry filtrů

Řád filtru

Řád filtru nám udává, s jakou strmostí se mění přenosová funkce filtru z propustného pásma do pásma nepropustného a naopak. Můžeme říct, že čím vyšší řád, tím více se bude charakteristika blížit ideálnímu filtru a zvýší se potlačení přenosu v nepropustném pásmu. Nevýhodou je, že s rostoucím řádem nám roste i cena filtru. Proto se snažíme volit co nejnižší řád filtru a to za předpokladu zajištění požadovaného potlačení přenosu v nepropustném pásmu.

Mezní kmitočet

Je to kmitočet, při němž nastává pokles přenosu o 3dB. Tento kmitočet lze jednoduše měnit, a to pomocí prvků R a C, čímž dojde k posuvu modulové a fázové charakteristiky, ale nedojde ke změně jejich tvaru.

Jakost filtru

Činitel jakosti Q udává velikost ztrát v obvodu. Čím vyšší činitel jakosti tím menší jsou ztráty. U cívek jsou ztráty způsobeny odporem vodičů, jímž jsou navinuty. U kondenzátorů Q určuje dielektrické ztráty.

1.6. Principy funkce filtrů ARC

Při realizaci filtrů RLC pro nízké kmitočty jsou hlavním problémem kvalita, rozměry a cena cívek. Z tohoto důvodu se pro nízké kmitočty nahrazují filtry RLC aktivními filtry RC (ARC filtry). Jejich princip spočívá v náhradě cívky, a to zapojením aktivního prvku (operační zesilovač, tranzistor) se dvěma rezistory a kondenzátory.

Můžeme říci, že ARC filtry 2. řádu se skládají ze dvou kondenzátorů a dvou rezistorů (R_1 , R_2 , C_1 , C_2). Vhodnou volbou těchto prvků můžeme nastavit rezonanční kmitočet a hodnotu činitele jakosti Q. Součástí obvodu je jeden či více aktivních prvků, obvykle se jedná o operační zesilovač, jenž ovlivňuje hodnotu činitele jakosti Q.

1.7. Kritéria návrhu filtru

Při návrhu filtru je nutné si stanovit vlastnosti, které od něj budeme požadovat: [1]

Základní přenosové vlastnosti v kmitočtové oblasti

- modulová charakteristika (strmost, chyby přenosu v propustném pásmu, potlačení přenosu v nepropustném pásmu)
- fázová charakteristika (linearita), nebo lépe skupinové zpoždění (konstantnost)

Základní přenosové vlastnosti v časové oblasti

- odezva na jednotkový skok (překmit, doba náběhu a ustálení)
- odezva na jednotkový impulz

Dynamické vlastnosti

- max. úroveň vstupního signálu
- vliv rušivých signálů, šum a z toho vyplývající dynamický rozsah

Realizační problémy

- řád filtru, jeho odpovídající složitost a cena
- vliv reálných vlastností prvků (parazitní vlastnosti, ztráty) a prostředí (teplota)
- citlivosti přenosových vlastností na tolerance hodnot prvků
- možnost výběru hodnot prvků z vyráběných řad

2. NÁVRHY MODELŮ AKTIVNÍCH FILTRŮ

Cílem je navrhnout zapojení základních kmitočtových filtrů 1. řádu až 5. řádu, a to pro jednotlivé typy aproximací. Při návrhu filtrů pomocí Butterworthova polynomu nám jsou zadány normované koeficienty, které jsou zobrazeny v Tab. 1.

Tab. 1: Normované koeficienty pro Butterworthovu aproximační funkci pro 1Hz [1]

n	2	3		4		5		
F_0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Q	0,7071		1,0	0,5412	1,3066		0,6180	1,6180

Postupy výpočtů byly převzaty z [1]. Hodnoty prvků budeme určovat pro $Q < 15$ a pro hodnotu mezního kmitočtu $f_m = 5kHz$ (dolní propust). Návrh bude principiálně stejný pro dolní propust i pro horní propust, proto je uveden pouze pro dolní propust.

Relativně beze změny bude také způsob návrhu pomocí jiné aproximace, V tomto případě se změní normované koeficienty (viz. Tab. 2. a Tab. 3).

Tab. 2: Normované koeficienty pro Besselovu aproximační funkci pro 1Hz

n	2	3		4		5		
F_0	1,272	1,3248	1,4499	1,4329	1,6058	1,5047	1,5588	1,7582
Q	0,5773		0,6911	0,5219	0,8055		0,5635	0,9165

Tab. 3: Normované koeficienty pro Čebyševovu aproximační funkci 3dB pro 1Hz

n	2	3		4		5		
F_0	0,8414	0,2986	0,9161	0,4427	0,9503	0,1775	0,6140	0,9675
Q	1,3047		3,0677	1,0765	5,5789		2,1375	8,8178

V přílohách je přiloženo pár vybraných simulačních schémat pro představu, jak je vyřešeno zapojení pásmových zádrží.

2.1. Návrh dolní propusti 1. řádu

Budeme-li uvažovat nulový vnitřní odpor zdroje signálu a nekonečný odpor zátěže, návrh se nám zjednoduší. Máme zde jeden stupeň volnosti, což nám umožňuje zvolit si jeden ze dvou pasivních prvků. [1]

Jednoduší bude zvolit si kapacitu C , protože realizace hodnot kapacit mimo řady E6 a E12 je obtížnější a především dražší než u rezistorů. Kapacitu si tedy můžeme téměř libovolně zvolit.

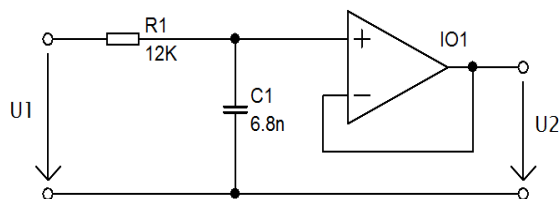
$$C = 3,9nF$$

Tato hodnota se pro praktické realizace dosazuje z řady E6 nebo E12, a volí se tak, aby i rezistor R byl realizovatelný v jedné z odporových řad. Hodnotu odporu R pro filtry 1. řádu vypočteme ze vztahu

$$R = 1/2\pi f_0 C = 8,16k\Omega \quad (2.1)$$

Skutečnou hodnotu mezního kmitočtu po návrhu a přizpůsobení součástek určíme ze vztahu

$$f_0 = 1/2\pi RC \quad (2.2)$$



Obr. 4.:Zapojení typu dolní propust 1. řádu pro $f_0 = 5kHz$

2.2. Návrh dolní propusti 2. řádu

Postup návrhu byl převzat z [1].

Při návrhu filtru si musíme zvolit typ aproximace, čímž jsou nám zadány hodnoty $Q = 0,7071$ a $F_0 = 1,0$, dále si zadáme mezní kmitočet $f_m = 5kHz$.

Z požadované hodnoty Q vypočteme hodnotu β_{min} (pro $Q < 15$)

$$\beta_{min} = 4Q^2 = 2 \quad (2.3)$$

Dále volíme hodnoty kapacit $C1$ a $C2$. Orientačně vypočteme střední hodnotu C , a pomocí hodnoty β_{min} dopočítáme hodnoty $C1_{MAX}$ a $C2_{MIN}$. Jejich skutečné (reálné) hodnoty zvolíme například z řady E6 nebo E12. Ale dbáme na to, aby $\beta \geq \beta_{min}$.

$$C = 3 \cdot 10^{-7} / \sqrt{f_0} = 4,24 \cdot 10^{-9} F \quad (2.4)$$

$$C1_{MAX} = C / \sqrt{\beta_{min}} = 3nF \Rightarrow C1 = 2,7nF \text{ (E12)} \quad (2.5)$$

$$C2_{MIN} = C \cdot \sqrt{\beta_{min}} = 6nF \Rightarrow C2 = 6,8nF \text{ (E12)} \quad (2.6)$$

V dalším kroku vypočteme β

$$\beta = C2 / C1 = 2,51 \quad (2.7)$$

Podmínka $\beta \geq \beta_{min}$ je splněna, proto přecházíme na volbu odporů $R1$ a $R2$, které vypočteme a následně dosadíme do realizovatelné hodnoty pomocí střední hodnoty odporu R a z poměru α , což vypočteme následovně

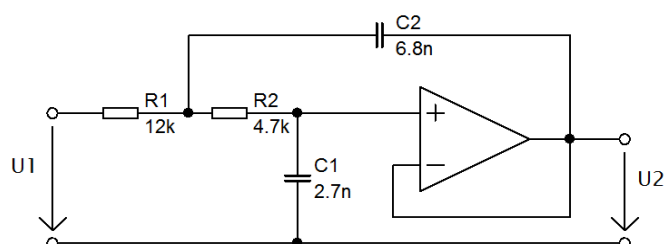
$$R = 1 / (2\pi f_0 \sqrt{C1 \cdot C2}) = 7478,7 \Omega \quad (2.8)$$

$$\alpha = \sqrt{\beta} / 2Q = 1,12 \quad (2.9)$$

$$\alpha = 1 / (a + \sqrt{a^2 - 1})^2 = 0,379 \quad (2.10)$$

$$R1 = R / \sqrt{\alpha} = 12066\Omega \Rightarrow R1 = 12k\Omega (E12) \quad (2.11)$$

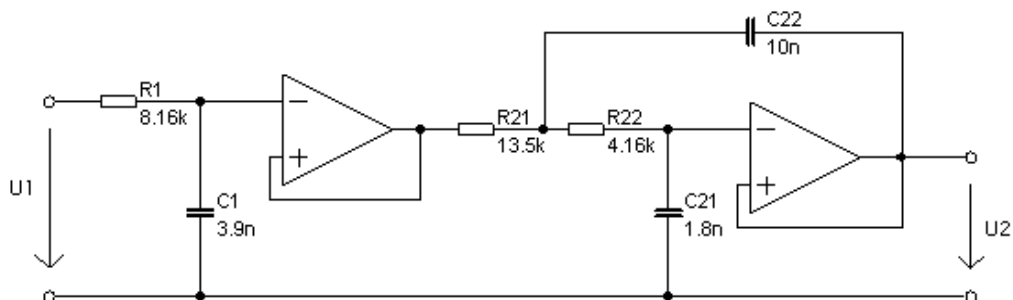
$$R2 = R \cdot \sqrt{\alpha} = 4573\Omega \Rightarrow R2 = 4,7k\Omega (E12) \quad (2.12)$$



Obr. 5: Zapojení typu dolní propust 2. řádu pro $f_0 = 5kHz$

2.3. Návrh dolní propusti 3. řádu

Návrh bude realizován řazením dolní propusti 1. řádu a dolní propusti 2. řádu do série. Návrh dolní propusti 1. řádu bude stejný, ale u 2. řádu se změní hodnota Q . Pro návrh použijeme koeficienty z Tab. 1.

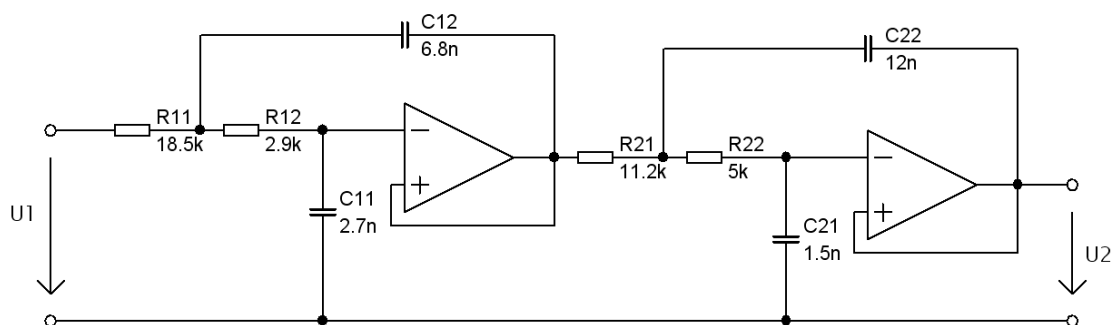


Obr. 6: Zapojení typu dolní propust 3. řádu pro $f_0 = 5kHz$

Vypočtené hodnoty součástek jsou přehledně zobrazeny ve schématu zapojení (Obr. 6.). Výsledkem je kaskáda bloků – jednoho 1. řádu a jednoho 2. řádu

2.4. Návrh dolní propusti 4. řádu

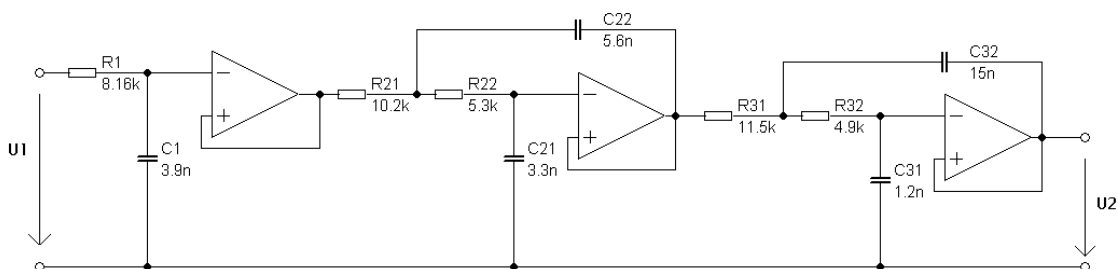
Návrh bude realizován řazením dvou dolních propustí 2. řádu do série. Návrh těchto propustí podléhá stejným pravidlům, ale budou použity jiné normované koeficienty (koeficienty určené pro 4. řád). Pro návrh použijeme koeficienty z Tab. 1. Výsledkem je kaskádní zapojení dvou dolních propustí 2. řádu.



Obr. 7: Zapojení typu dolní propust 4. řádu pro $f_0 = 5kHz$

2.5. Návrh dolní propusti 5. řádu

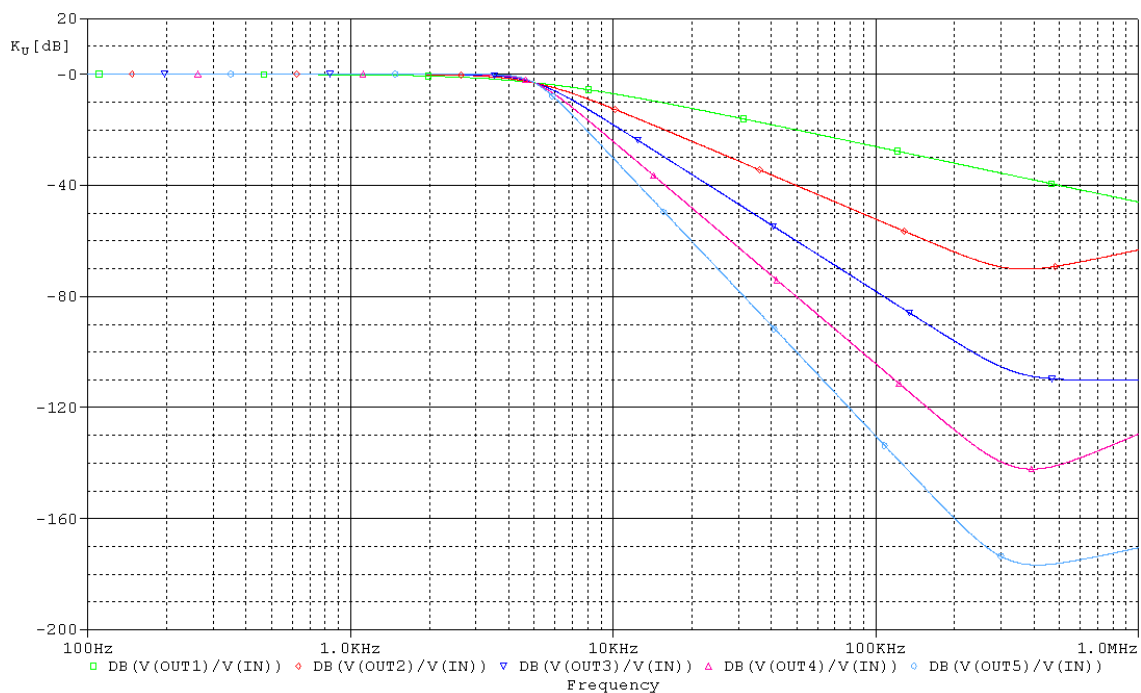
Návrh bude realizován řazením jedné dolní propusti 1. řádu a dvou dolních propustí 2. řádu do série. Návrh těchto propustí podléhá stejným pravidlům, která byla doposud použita. Pro návrh použijeme koeficienty pro 5. řád z Tabulky (Tab. 1). Výsledkem je kaskáda bloků – jednoho 1. řádu a dvou 2. řádu (Obr. 8)



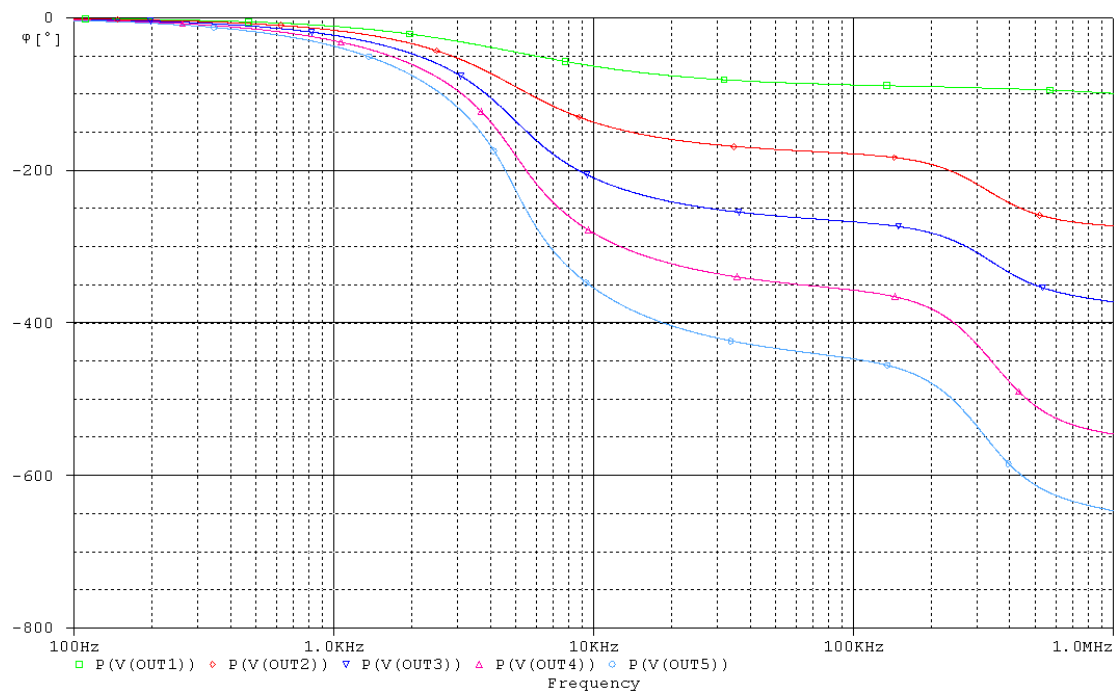
Obr. 8: Zapojení typu dolní propust 5. řádu pro $f_0 = 5kHz$

3. SIMULACE NAVRŽENÝCH FILTRŮ

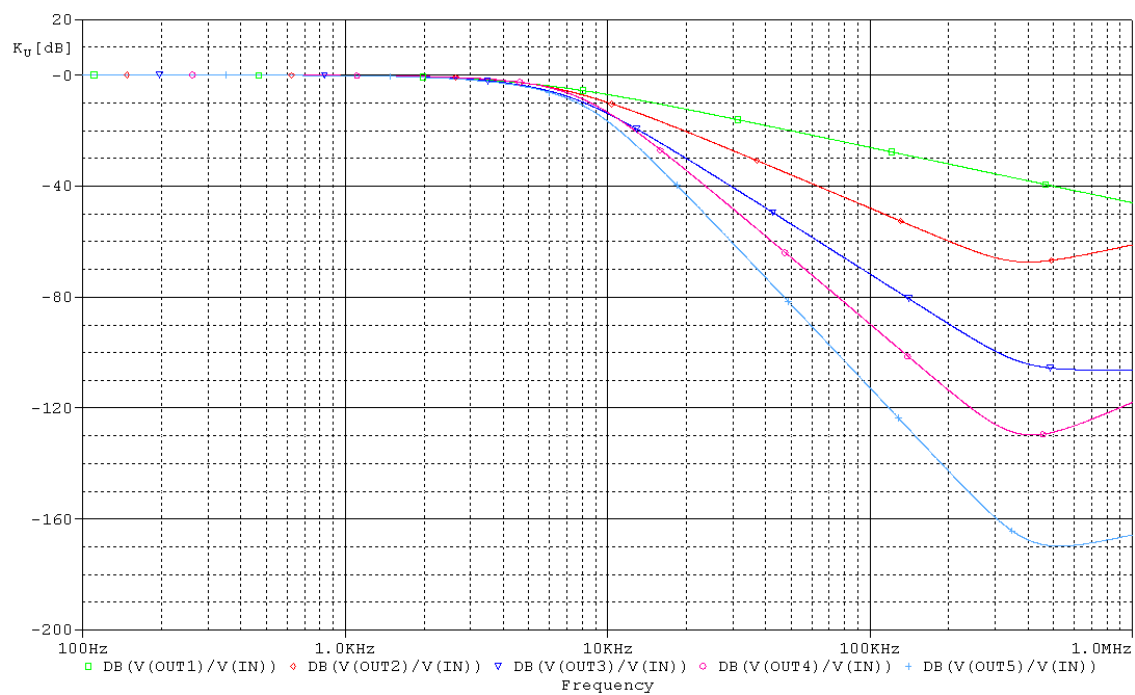
3.1. Dolní propust



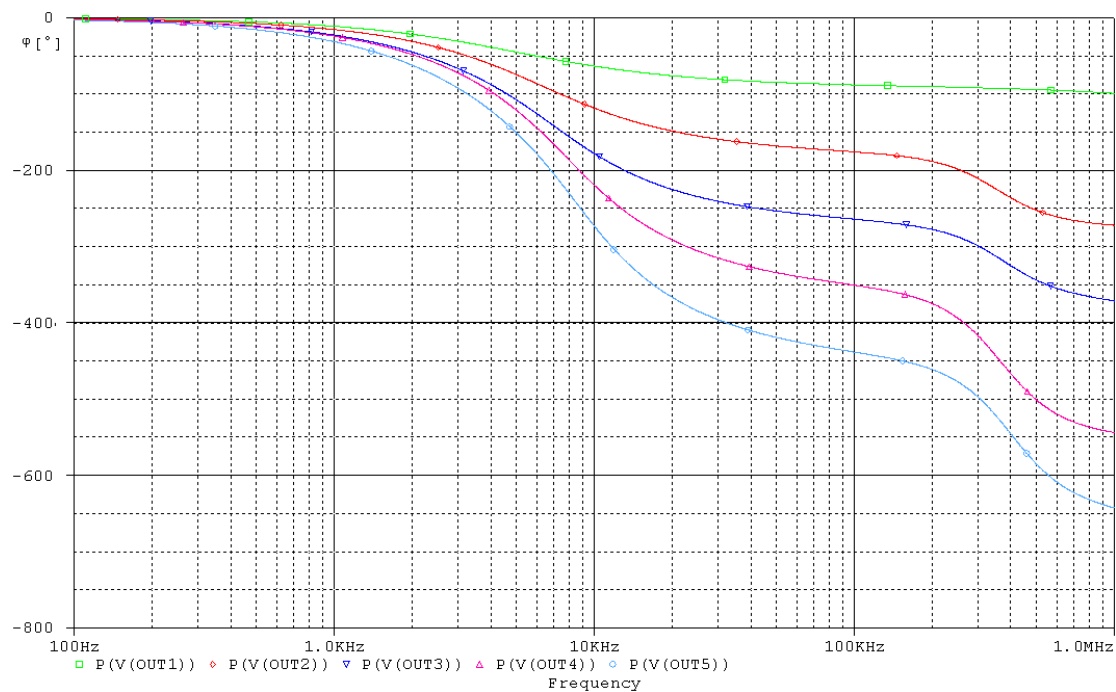
Obr. 9: Modulová charakteristika Butterworthovy aproximace pro DP 1. až 5. řádu



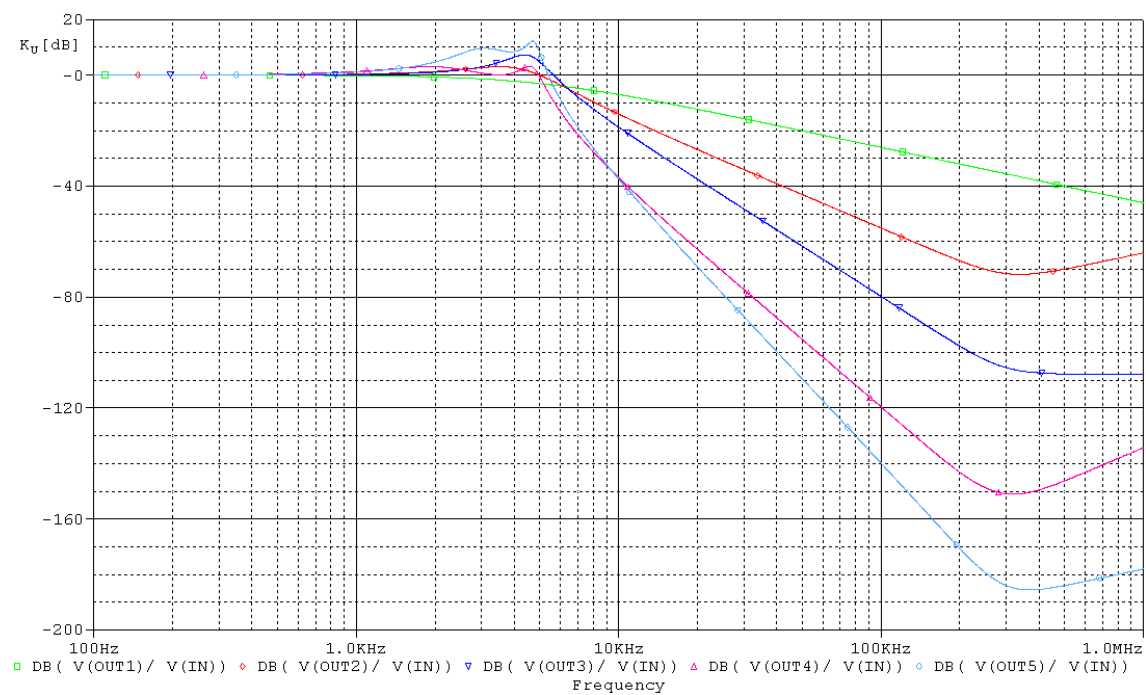
Obr. 10: Fázová charakteristika Butterworthovy aproximace DP 1. až 5. řádu



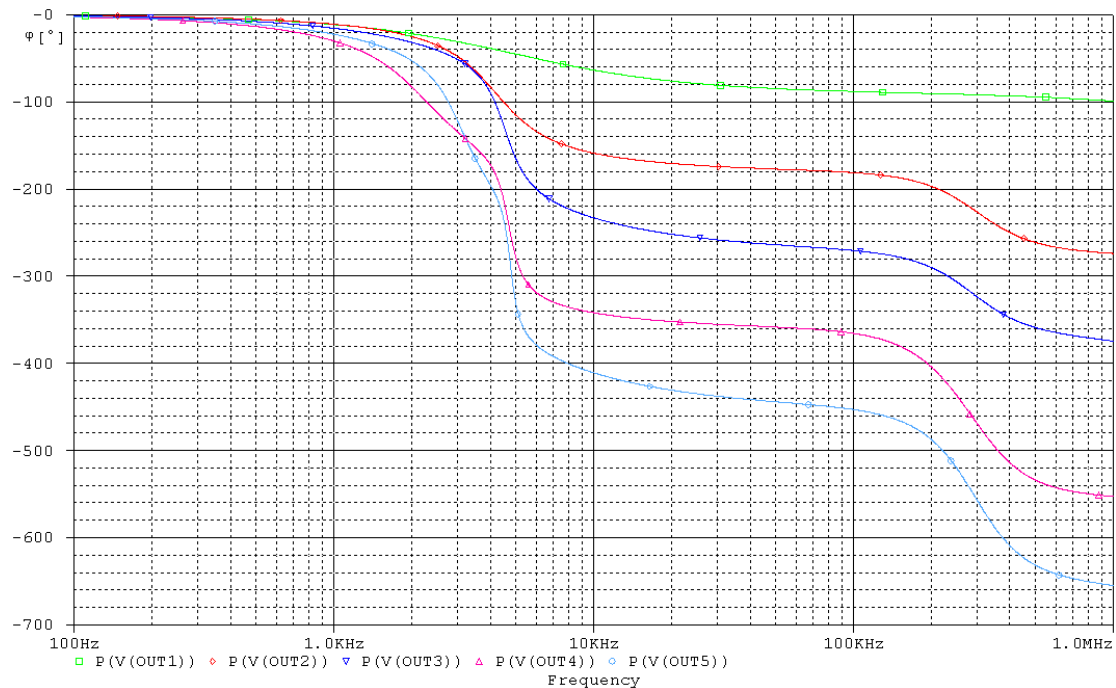
Obr. 11: Modulová charakteristika Besselovy aproximace pro DP 1. až 5. řádu



Obr. 12: Fázová charakteristika Besselovy aproximace DP 1. až 5. řádu



Obr. 13: Modulová charakteristika Čebyševovy aproximace pro DP 1. až 5. řádu



Obr. 14: Fázová charakteristika Čebyševovy aproximace DP 1. až 5. řádu

Mezní kmitočet pro dolní propusti všech tří aproximací (Butterworthova, Besselova, Čebyševova) je $f_0 = 5\text{kHz}$. Na Obr. 9 je zobrazena modulová charakteristika Butterworthovy dolní propusti v logaritmickém měřítku. Tato aproximace má charakteristickou strmost 20 dB/dek. (tj. rozdíl přenosů o 20dB pro kmitočty s desetinásobným poměrem hodnot). Strmost průběhu se zvětšuje s rostoucím řádem filtru. Fázová charakteristika na Obr. 10 nám znázorňuje závislost výstupní fáze napětí na frekvenci.

Modulová charakteristika Besselovy dolní propusti zobrazena na Obr. 11 má menší strmost než Butterworthovo zapojení, ale jeho předností je použití pro fázově modulované signály. Jeho fázové průběhy jsou vyobrazeny na Obr. 12.

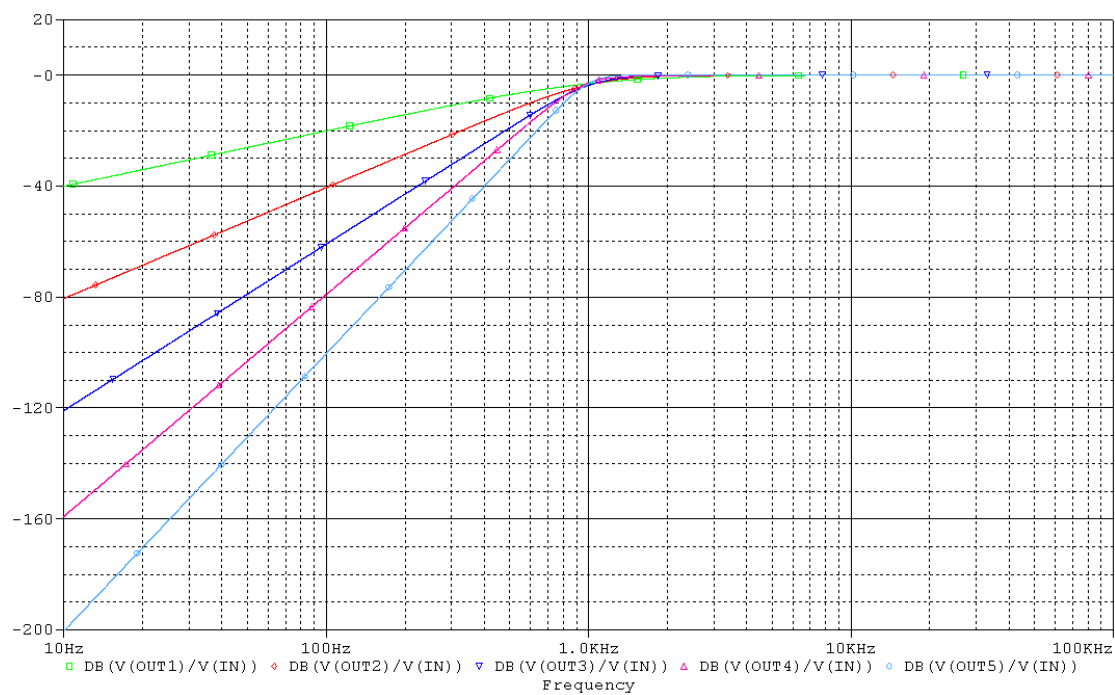
Čebyševova dolní propust (Obr. 13) je prakticky nejstrmější běžně používanou aproximací, zvládne dostatečně potlačit přenos za použití relativně nízkého řádu filtru. V propustném pásmu je poměrně velké charakteristické zvlnění, které se dá zvolit v rozsahu 0,1 – 3dB. Volbou menšího zvlnění dosáhneme menší strmosti, ale pozitivně ovlivníme fázové vlastnosti celého filtru. Fázová charakteristika (Obr. 14) má ve vyšších řádech poměrně výrazné nelinearity.

Na modulových charakteristikách si můžeme všimnout jakéhosi zákmitu, který je pravděpodobně způsoben parazitními vlivy vysokých kmitočtů, většina operačních zesilovačů bývá kmitočtově omezená.

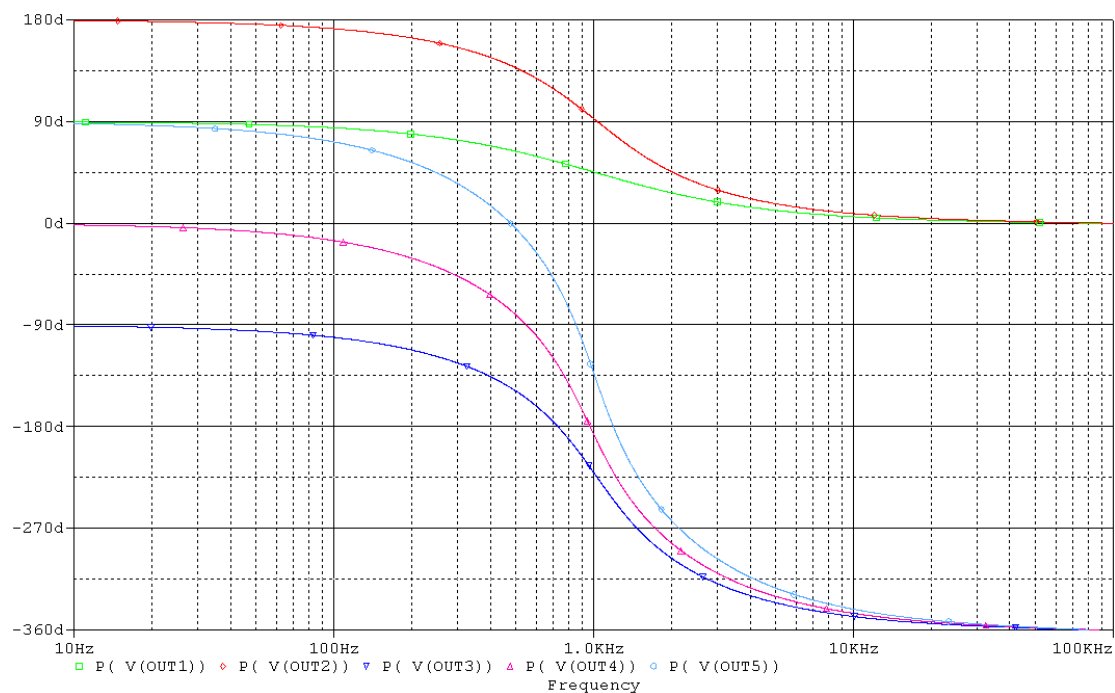
3.2. Horní propust

Pro zapojení horních propustí byl zvolen mezní kmitočet $f_0 = 1\text{kHz}$. Návrh těchto propustí je totožný s návrhem dolních propustí, akorát s rozdílným mezním kmitočtem.

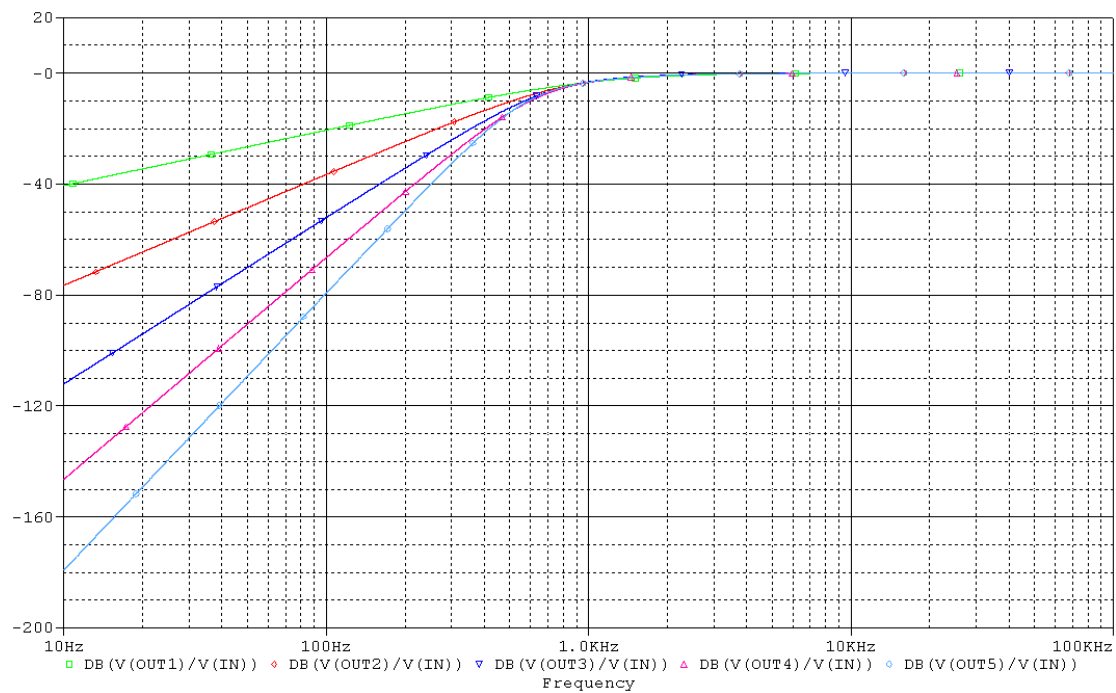
Na Obr. 15 je vyobrazena modulová charakteristika Butterworthovy horní propusti. Z tohoto průběhu je patrné, že horní propusti jsou stranově převrácené podle mezního kmitočtu f_0 vůči dolním propustem. Fázové charakteristiky jsou shodné, ale fázově posunuty o 90° pro 1. řád, 180° pro 2. řád, 270° pro 3. řád.



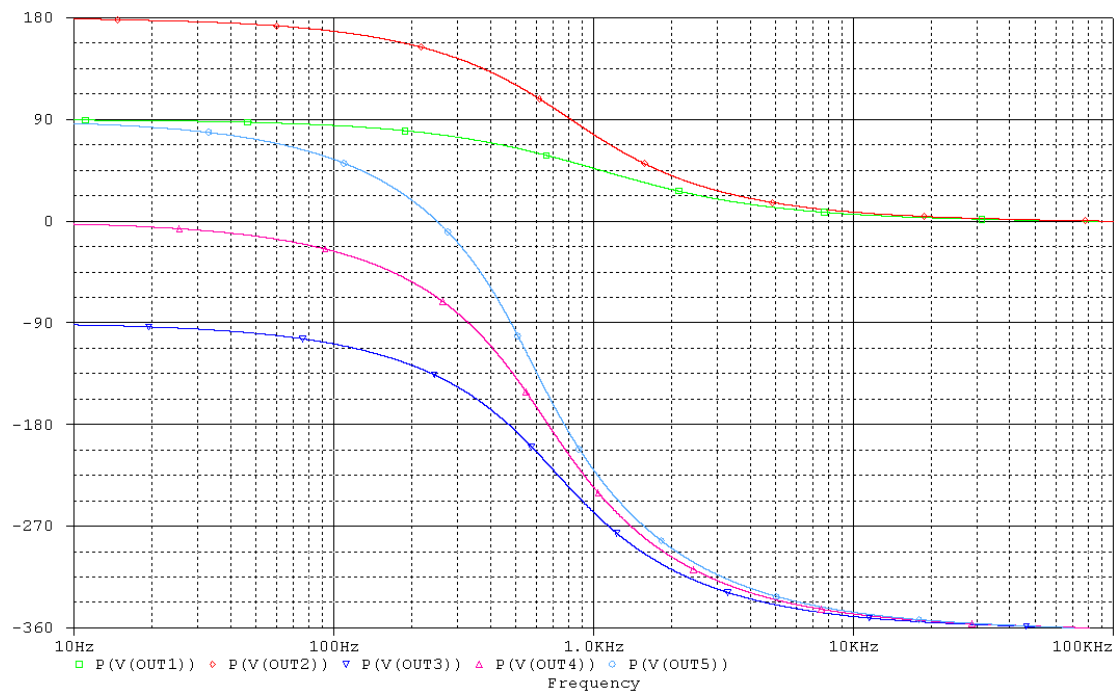
Obr. 15: Modulová charakteristika Butterworthovy aproximace pro HP 1. až 5. řádu



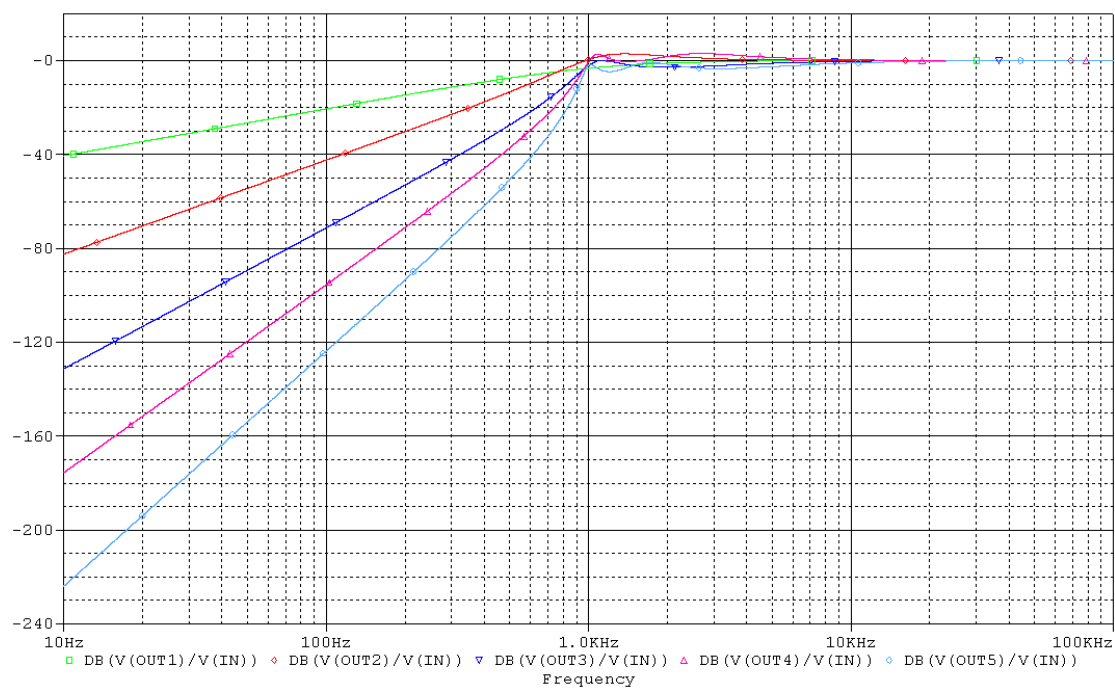
Obr. 16: Fázová charakteristika Butterworthovy aproximace HP 1. až 5. řádu



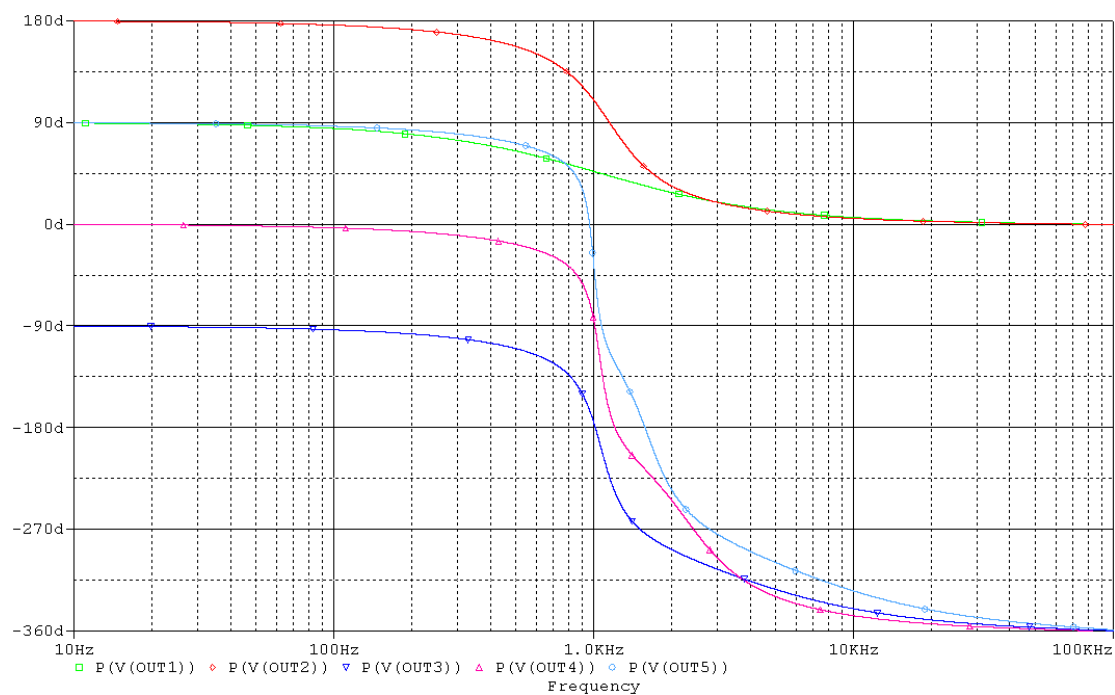
Obr. 17: Modulová charakteristika Besselovy aproximace pro HP 1. až 5. řádu



Obr. 18: Fázová charakteristika Besselovy aproximace HP 1. až 5. řádu

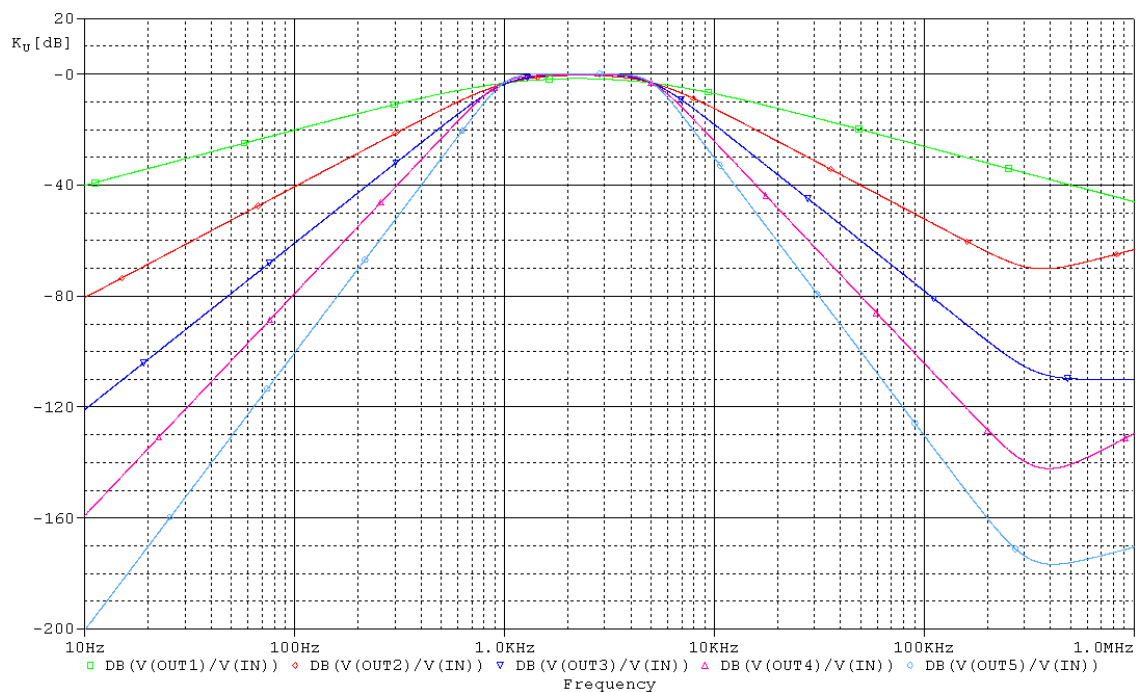


Obr. 19: Modulová charakteristika Čebyševovy aproximace pro HP 1. až 5. řádu

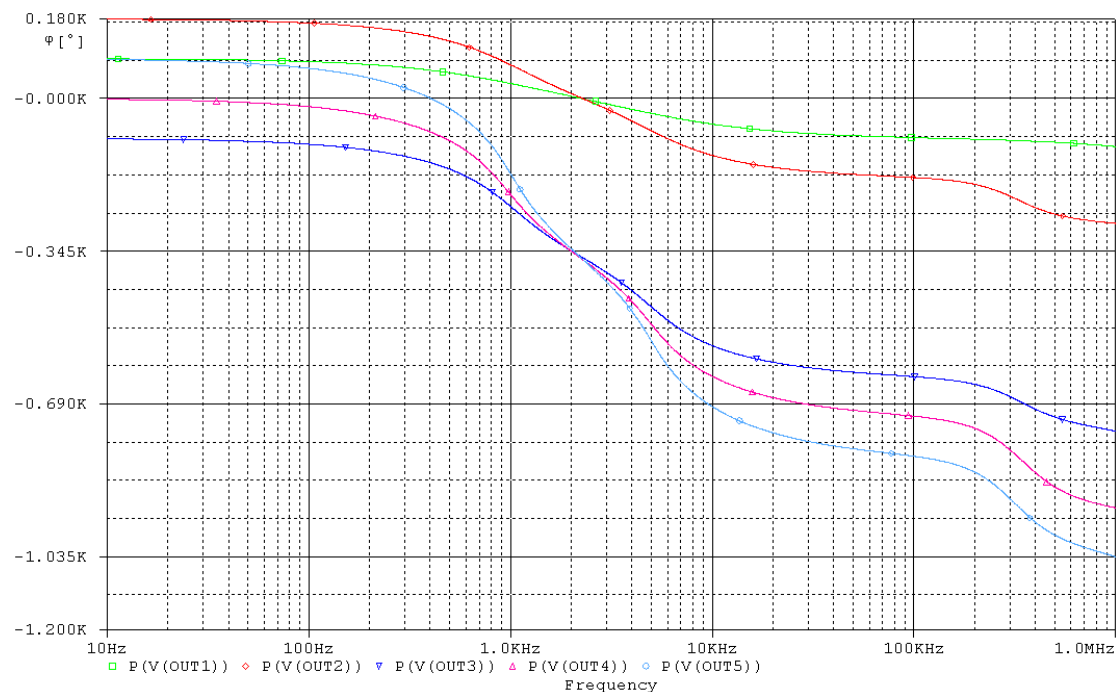


Obr. 20: Fázová charakteristika Čebyševovy aproximace HP 1. až 5. řádu

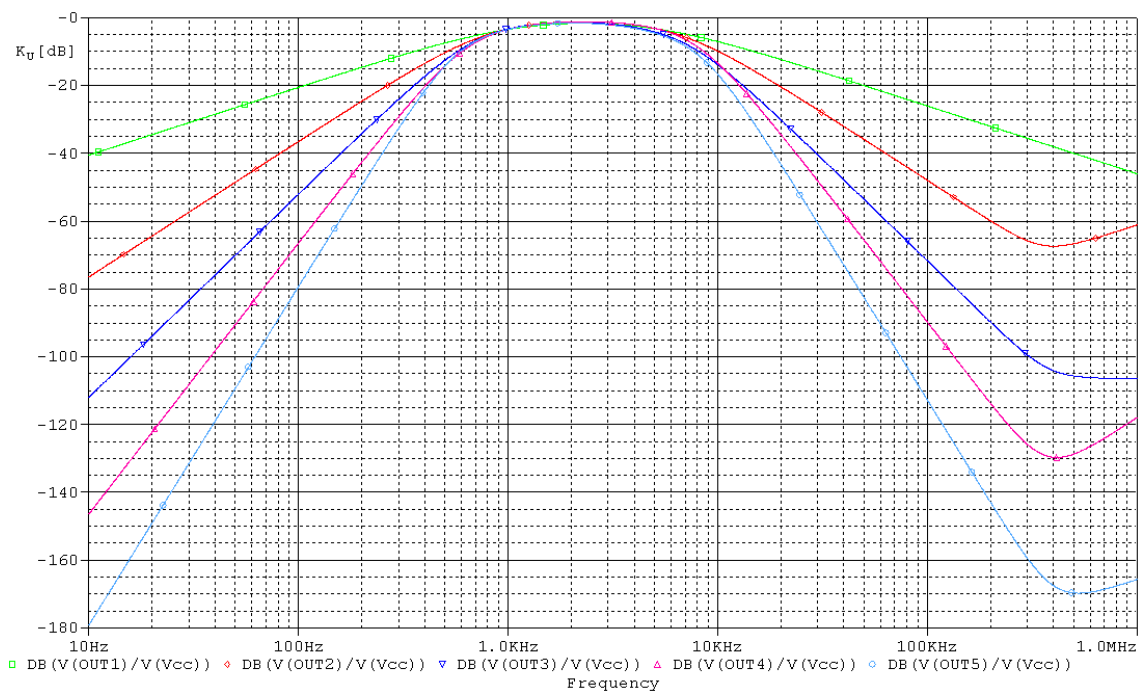
3.3. Pásmová propust



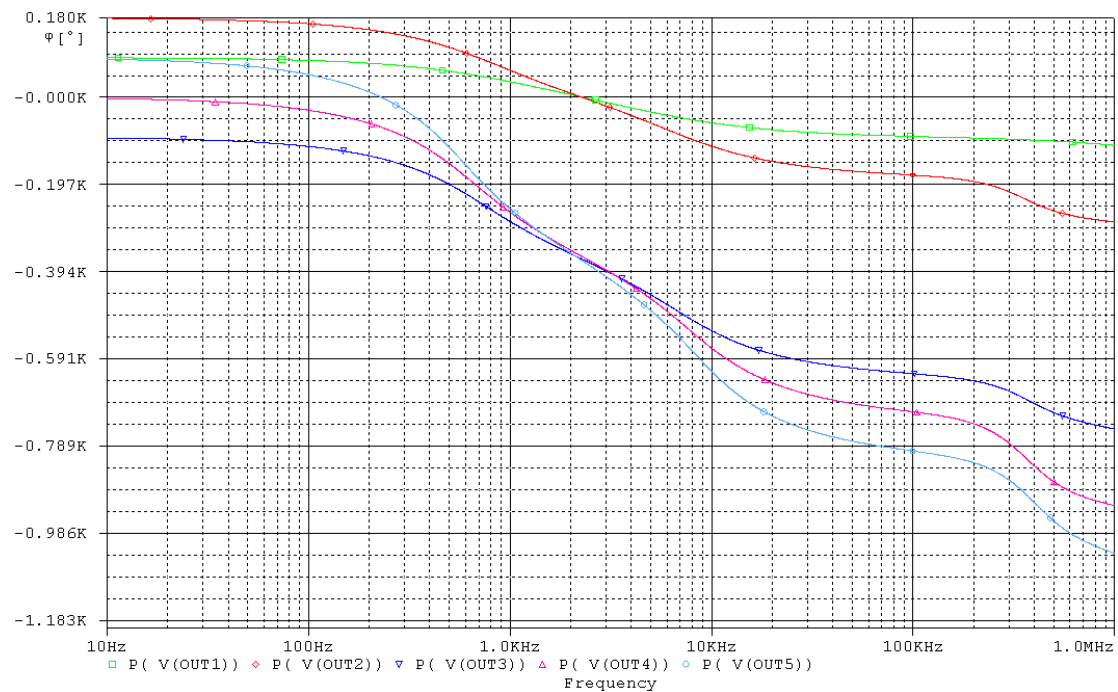
Obr. 21: Modulová charakteristika Butterworthovy aproximace pro PP 1. až 5. řádu



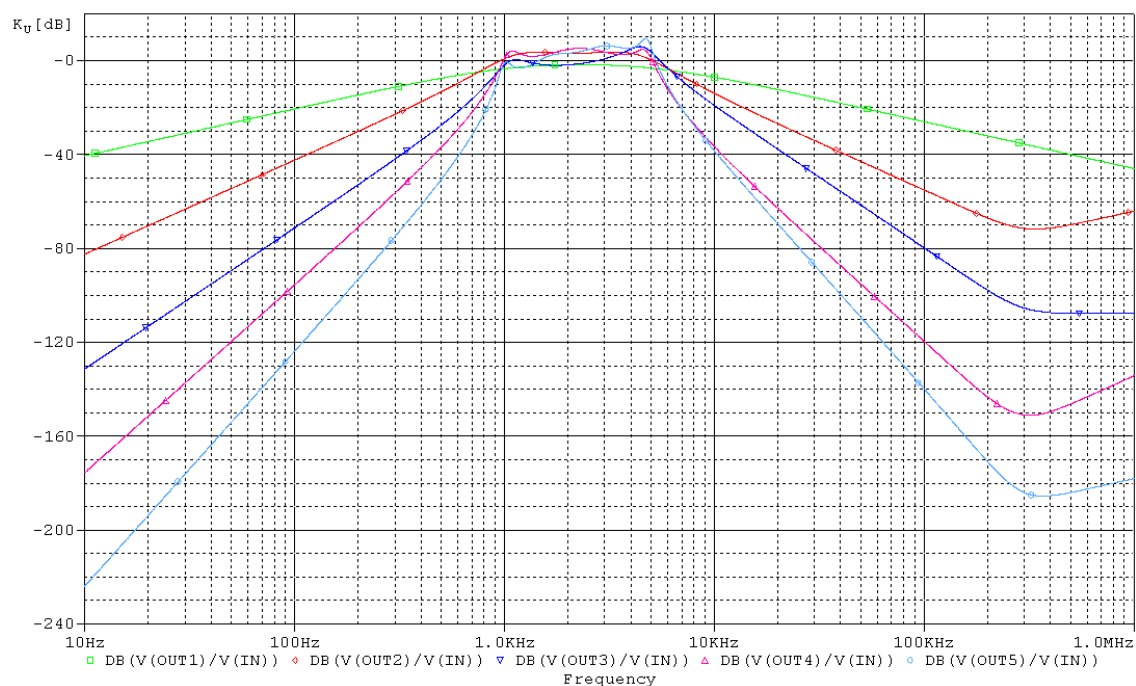
Obr. 22: Fázová charakteristika Butterworthovy aproximace pro PP 1. až 5. řádu



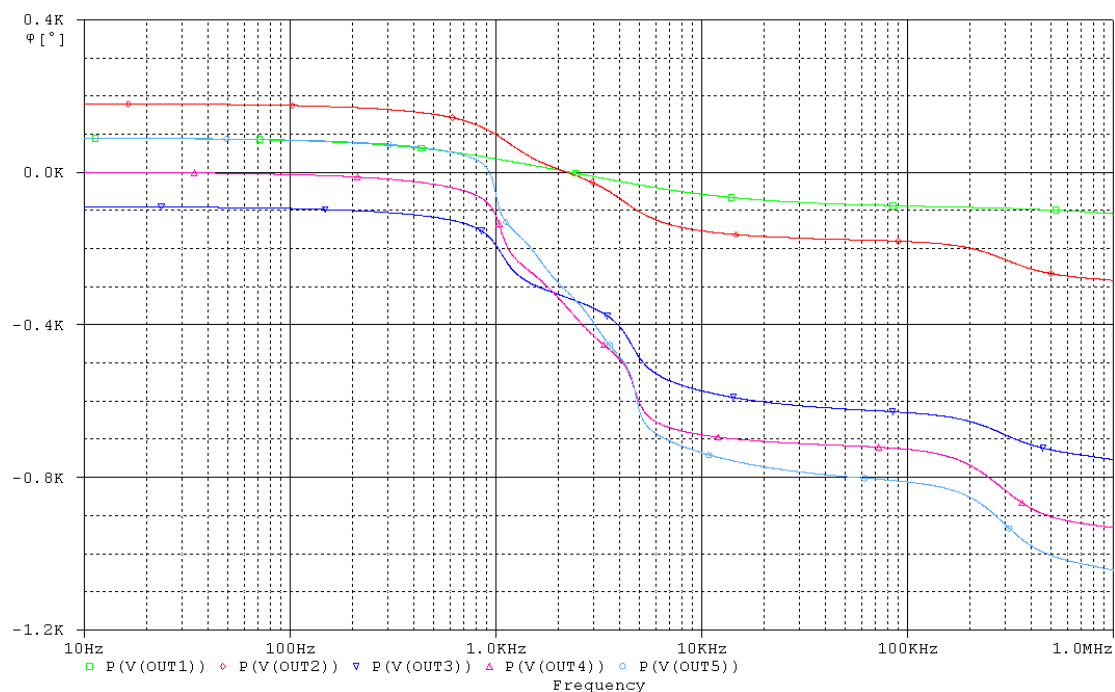
Obr. 23: Modulová charakteristika Besselovy aproximace pro PP 1. až 5. řádu



Obr. 24: Fázová charakteristika Besselovy aproximace PP 1. až 5. řádu



Obr. 25: Modulová charakteristika Čebyševovy aproximace pro PP 1. až 5. řádu



Obr. 26: Fázová charakteristika Čebyševovy aproximace PP 1. až 5. řádu

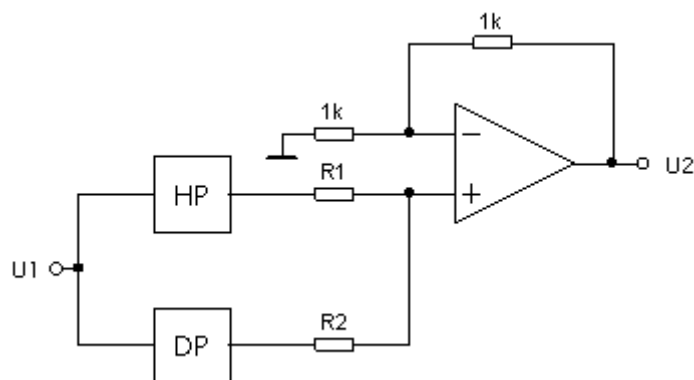
Návrh pásmové propust byl proveden sériovým (kaskádním) řazením dílčích zapojení horní a dolní propusti, dolní mezní kmitočet $f_{01} = 1\text{kHz}$ a horní mezní kmitočet $f_{02} = 5\text{kHz}$. Sečtením dílčích filtrů DP a HP dostaneme požadovanou modulovou charakteristiku, to proto, že pracujeme v logaritmických souřadnicích.[3]

Modulové charakteristiky jsou tedy ‚složeny‘ z dílčích modulových charakteristik HP a DP, a mají stejné vlastnosti a parametry (viz. Obr. 21, 23, 25). Stejnými vlastnostmi je myšlena strmost nárůstu a poklesu přenosu.

Fázové charakteristiky se pohybují v rozsahu od maximální hodnoty fáze horní propusti až po minimální (maximální zápornou) hodnotu fáze dolní propusti. To je patrné jednak z Obr. 22, ale také z ostatních fázových frekvenčních charakteristik pásmových propustí.

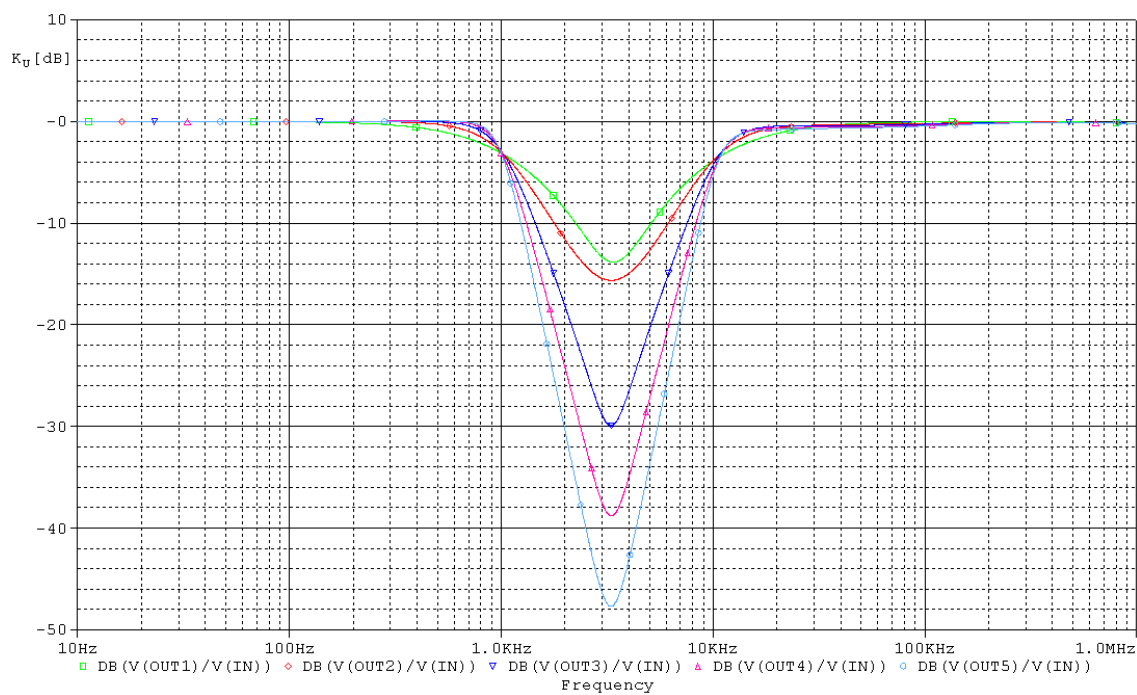
3.4. Pásmová zadrž

Pro návrh a realizaci pásmové zadrž vyšších řádů se používá paralelní zapojení horní a dolní propusti. Signály procházející dílčími obvody se přivedou na vstup sumačního zesilovače tvořeného operačním zesilovačem se zesílením $A = 1$. Vhodnou volbou rezistorů R_1 a R_2 můžeme nastavit velikost vstupních signálů na stejnou hodnotu. Při návrhu je nutno zachovat podmínku $f_{0DP} < f_{0HP} \equiv f_{01} < f_{02}$. [4]

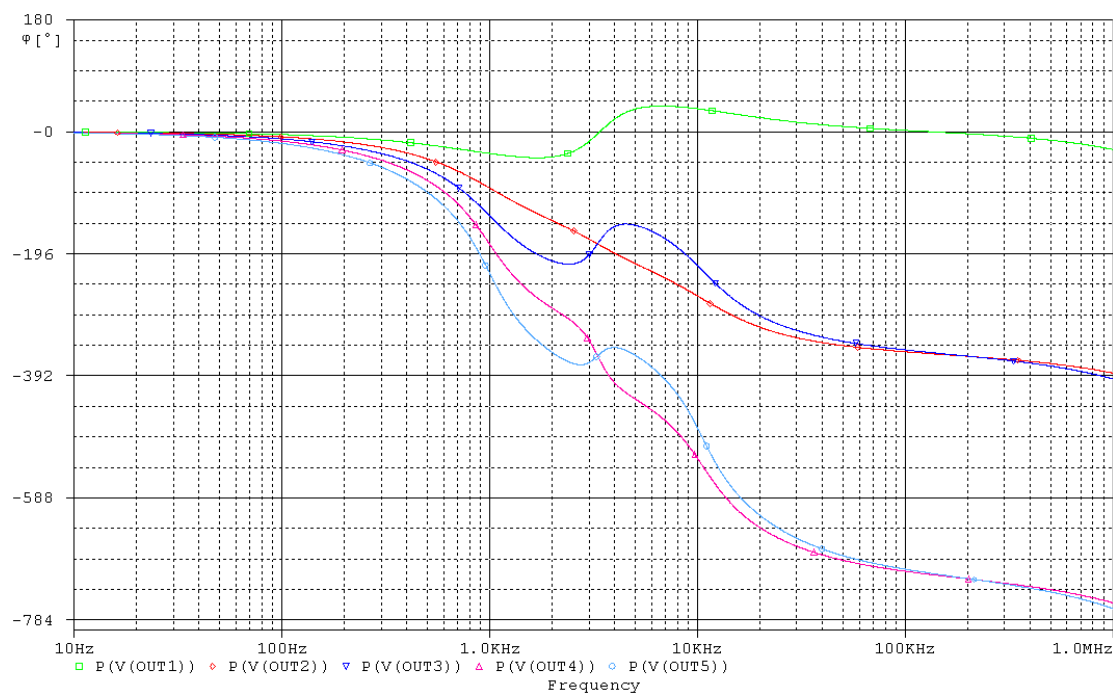


Obr. 27: Blokové schéma pásmové zadrž

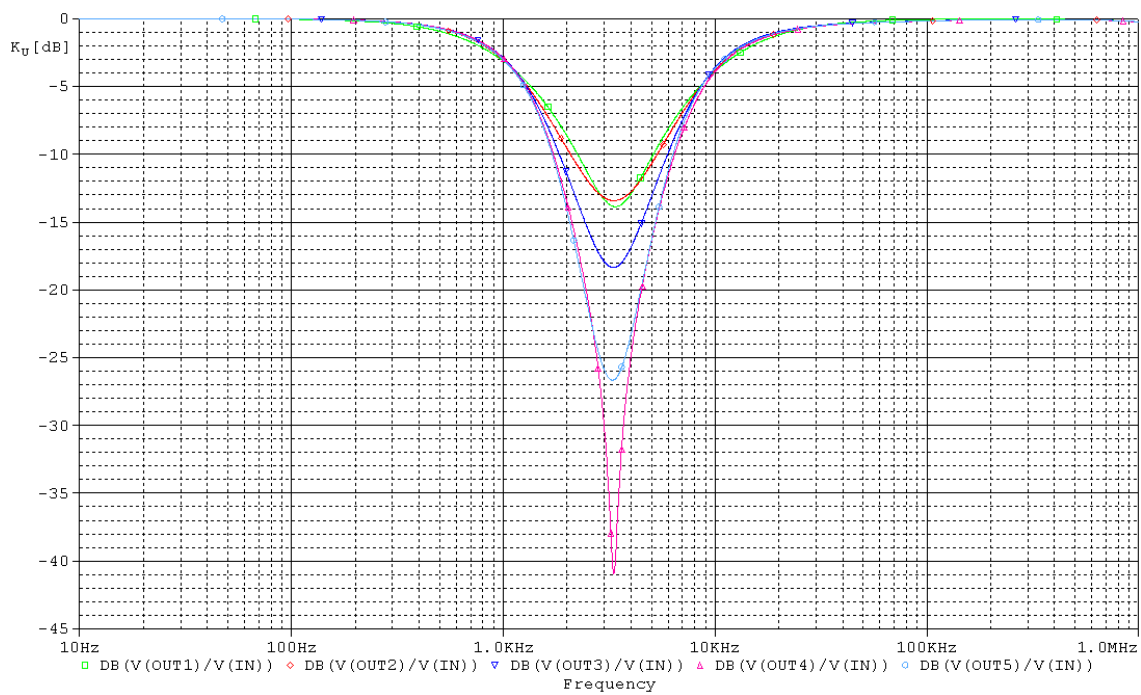
Již z názvu plyne, že pásmová zadrž nám slouží k zadržení námi zadaného kmitočtového pásma, které se udává dolním a horním mezním kmitočtem (f_{0DP} a f_{0HP}). Modulové a fázové kmitočtové charakteristiky pásmových zadrž jsou zobrazeny dále.



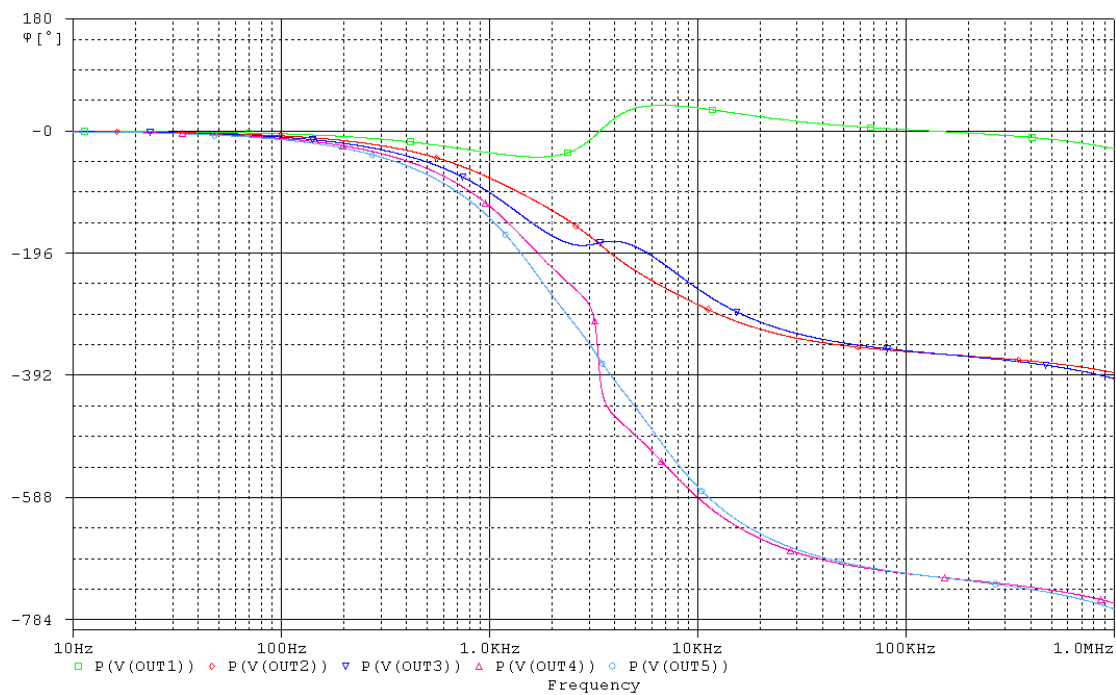
Obr. 28: Modulová charakteristika Butterworthovy aproximace pro PZ 1. až 5. řádu



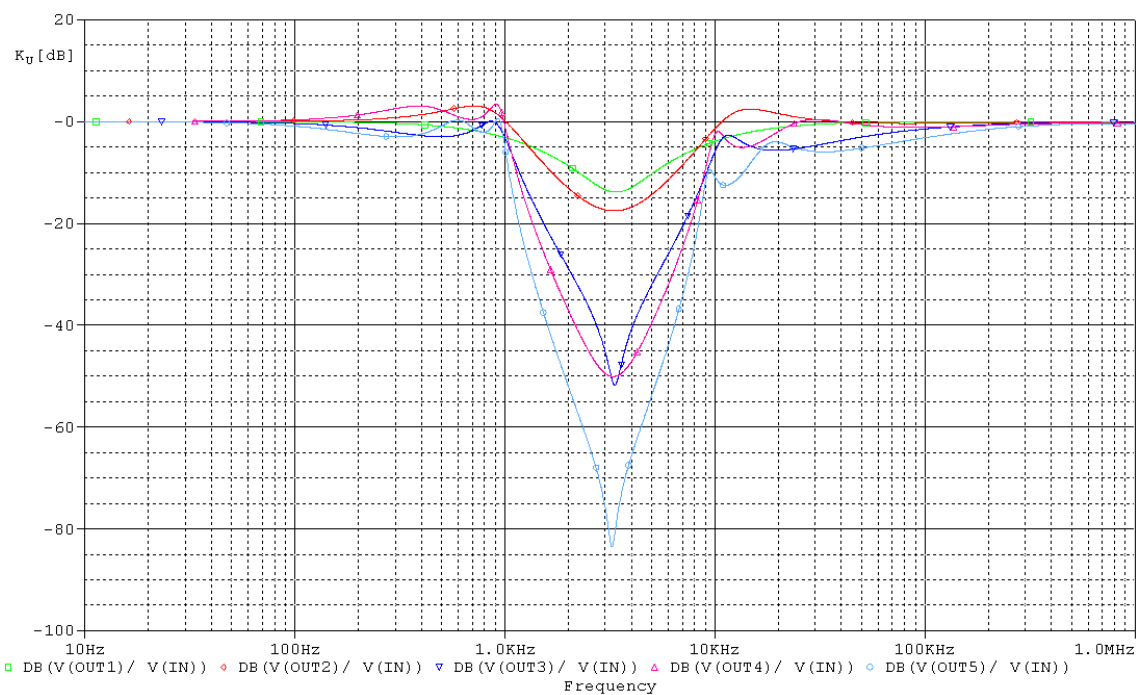
Obr. 29: Fázová charakteristika Butterworthovy aproximace PZ 1. až 5. řádu



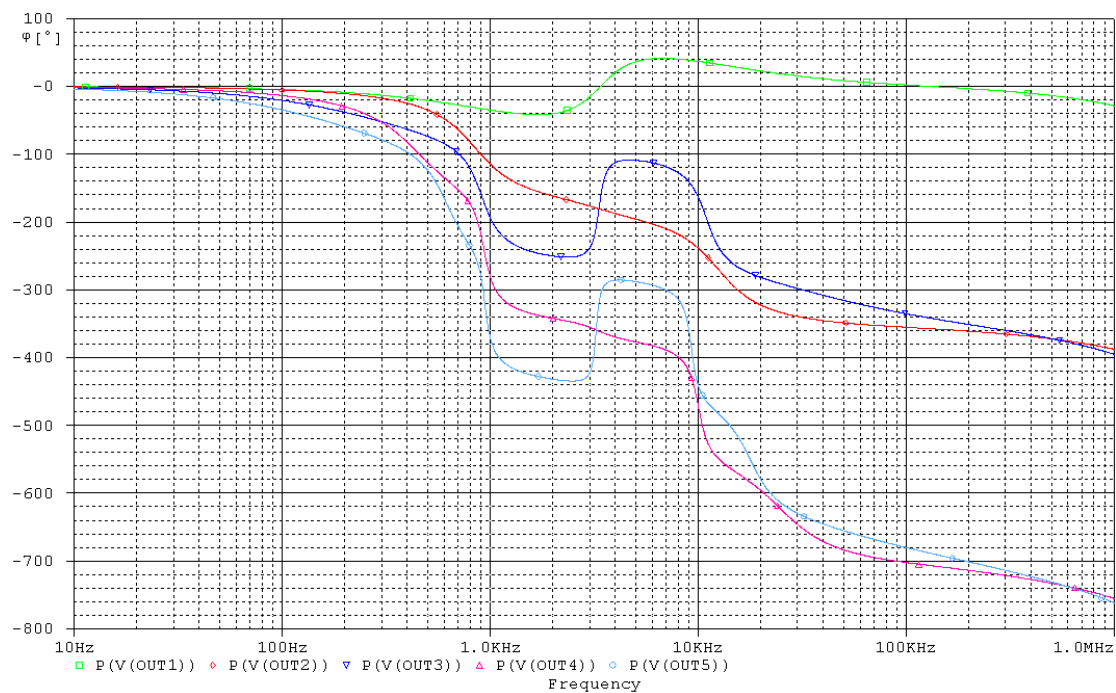
Obr. 30: Modulová charakteristika Besselovy aproximace pro PZ 1. až 5. řádu



Obr. 31: Fázová charakteristika Besselovy aproximace PZ 1. až 5. řádu



Obr. 32: Modulová charakteristika Čebyševovy aproximace pro PZ 1. až 5. řádu



Obr. 33: Fázová charakteristika Čebyševovy aproximace PZ 1. až 5. řádu

4. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo provést teoretický rozbor aktivních filtrů s operačními zesilovači, návrh jejich modelů a následné simulační ověření.

V teoretické části jsem zpracoval základní vlastnosti filtrů. Kmitočtové filtry mají velmi široké využití nejen v průmyslu, ale hlavně ve všech oblastech elektroniky a elektrotechniky. Aktivní filtry využívají aktivní prvky, především operační zesilovače, ale také různé moderní aktivní prvky (proudové konvejory), aby vytvořili přenosovou funkci s určitou kmitočtovou závislostí. Konstrukčně jsou aktivní filtry v této práci řešeny zapojením typu Sallen – Key. Použití jednoho operačního zesilovače, který je umístěn do jednoduché RC sítě, jenž nám umožňuje zvolit námi požadovanou přenosovou funkci pro maximálně filtr 2. řádu.

Pro návrh jsem využíval kaskádního řazení aktivních filtrů 1. řádu a 2. řádu. Jako aktivní prvek jsem zvolil operační zesilovač TL084. Navržené modely pro tři základní typy aproximací (Butterworthova, Besselova a Čebyševova) jsou nasimulovány a znázorněny modulovými a fázovými frekvenčními charakteristikami. Navržené filtry jsou nasimulovány pro první až pátý řád, což umožňuje názornou ukázkou toho, že s rostoucím řádem filtru nám roste charakteristická strmost, která je však závislá na vhodně zvolené aproximační funkci.

Můžeme říci, že simulace všech aktivních filtrů odpovídají teoretickým předpokladům, které jsou uvedeny v odborných literaturách. Těmito předpoklady jsou myšleny charakteristické strmosti modulových (amplitudových) charakteristik.

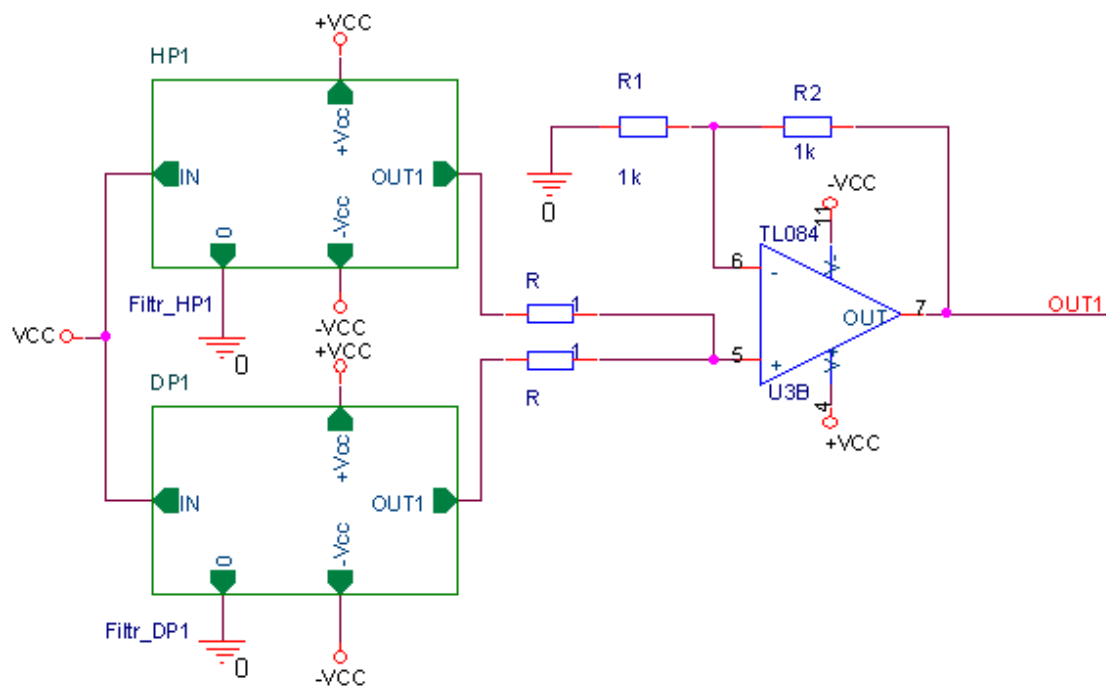
V této práci by se dalo zajisté pokračovat, nebo ji rozšířit. Vhodným rozšířením by bylo použití moderních aktivních prvků, jako jsou například proudové konvejory v různých pracovních módech. Vhodným pokračováním by bylo využití spínaných kondenzátorů. Také by bylo dobré zpracovat vyšší řády filtrů, a popsat i méně známé, ale stále dosti používané typy aproximací.

Seznam literatury:

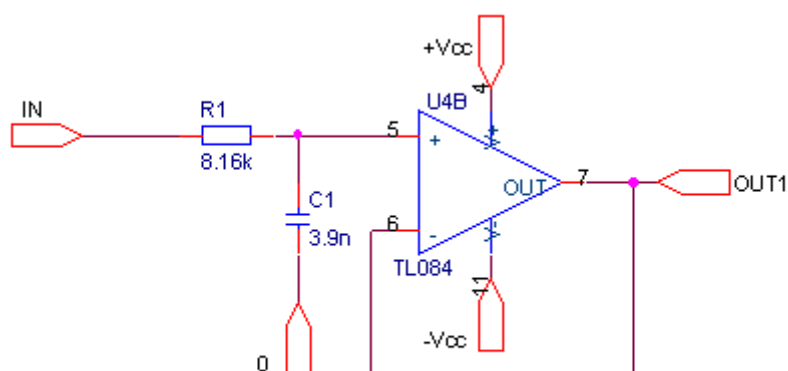
- [1] Hájek, K., Sedláček, J. *Kmitočtové filtry*. Praha, BEN 2002. ISBN 80-7300-023-7
- [2] Dostál, T., Axman, V. *Elektrické filtry*, Skripta VUT Brno
- [3] Dostál, T., *Analogové elektronické obvody* Skripta VUT Brno, 2004
- [4] Brandštetter, P., *Technické prostředky pro řízení elektrických pohonů* Skripta
Ostrava 2005

Přílohy:

Simulační schémata.



Příloha 1: Blokové schéma pásmové zadržky 1. řádu ($VCC \equiv U1$)



Příloha 2: Vnitřní zapojení bloku DP1 (dolní propusti 1. řádu)

